

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200810202654.7

[43] 公开日 2009 年 5 月 27 日

[51] Int. Cl.

H04L 29/08 (2006.01)

H04L 29/06 (2006.01)

H04L 12/28 (2006.01)

[11] 公开号 CN 101442551A

[22] 申请日 2008.11.13

[21] 申请号 200810202654.7

[71] 申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路 800 号

共同申请人 富士通株式会社

[72] 发明人 何 晨 高 博 蒋铃鸽 田 军
林 强

[74] 专利代理机构 上海交达专利事务所

代理人 毛翠莹

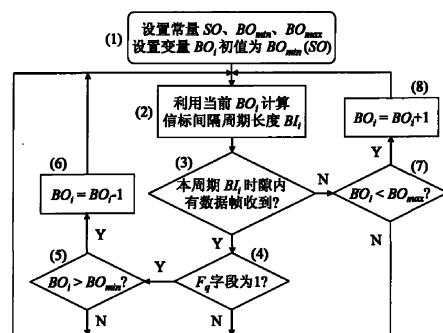
权利要求书 2 页 说明书 14 页 附图 5 页

[54] 发明名称

基于 IEEE802.15.4 协议的传感器节点占空比
独立自适应调节方法

[57] 摘要

本发明涉及一种基于 IEEE 802.15.4 协议的传感器节点占空比独立自适应调节方法，在节点流量较小时，通过延长该节点的休眠时间进而减少其功率消耗，同时降低该节点的信标帧接收频率进而减少其相应的接收功率消耗；在节点流量较大时，通过独立缩短该节点的休眠时间而保证其端到端时延性能，同时降低同一时间竞争信道的节点数进而改善吞吐量性能。节点同时采用能量高效休眠机制可使其于周期内活跃期提前进行休眠，从而进一步节省其功率消耗。本发明在保证节点能量高效的同时，使网络功率消耗和端到端时延在不同网络负载条件下取得良好的平衡，使网络协调器独立地根据从各节点收到的数据帧发送队列信息对各节点占空比和信标间隔周期同时地进行自适应调节。



1. 一种基于 IEEE 802.15.4 协议的传感器节点占空比独立自适应调节方法，其特征在于包括如下步骤：

1) 对于每个网内节点分别使网络协调器独立记录一个用于控制该节点信标间隔周期长度的信标指数，为每个节点的信标指数设置统一的调节范围，并取该调节范围中的最小值为初始广播的信标帧中各节点的信标指数初值；将用于控制各节点信标间隔周期中活跃期长度的超帧指数设定为不大于信标指数初值的常量；将由协调器控制的周期性信标帧的广播间隔设定为最小的信标间隔周期长度；由协调器广播初始信标帧，建立一个基于 IEEE 802.15.4 协议的无线传感器网络；

2) 协调器分别根据当前各信标指数计算相应的信标间隔周期长度，对相应的各节点进行独立定时计数，以掌握各节点的信标间隔周期的起始和结束时刻；同时，每个网内节点同样根据当前收到的信标指数计算其相应的信标间隔周期长度，以独立地进行定时，并与协调器对该节点信标间隔周期的控制保持同步；

3) 在各节点当前的信标间隔周期内，节点根据采用能量高效休眠机制的 IEEE 802.15.4 MAC 协议进行操作；在某一节点有数据帧发送的情况下，该节点需要为协调器提供自身的数据帧发送队列信息，即如果节点在发送数据帧的退避过程中检查到其缓冲区中还有其它待发数据帧或是又有新数据帧到达，那么此时该节点将其待发数据帧中的队列信息字段置位为 1，否则将其复位为 0；

4) 协调器根据对某一节点的定时计数信息，判断在该节点当前信标间隔周期内是否有收到其发送来的数据帧；如果收到该节点发送的数据帧，协调器进一步检查该数据帧中队列信息字段的值；如果队列信息字段值为 1，协调器在判断该节点的信标指数还未减少到最小值的情况下将该指数减 1 并将该节点的相关更新信息加入之后待广播的信标帧中，否则保持其最小值；如果队列信息字段值为 0，协调器保持该节点原有信标指数；如果在该节点的当前信标间隔周期结束时协调器仍未收到其发送的数据帧，协调器在判断该节点的信标指数还未

增加到最大值的情况下将该指数加 1 并将该节点的相关更新信息加入之后待广播的信标帧中，否则保持其最大值；

5) 各节点根据自身的定时信息在其当前信标间隔周期结束时，允许接收协调器新广播的信标帧并检查其中是否含有与其相关的信标指数更新信息；如果某一节点新接收的信标帧中含有与该节点相关的信标指数更新信息，则节点进行相应的信标指数更新操作，否则节点保持原有信标指数；在某一节点结束当前信标间隔周期并收到新的信标帧时，返回步骤 2 进入下一个信标间隔周期。

2. 根据权利要求 1 所述的基于 IEEE 802.15.4 协议的传感器节点占空比独立自适应调节方法，其特征在于节点采用一种能量高效休眠机制，即各节点在特定情况下于信标间隔周期内的活跃期即可提前进入休眠模式而不必等到非活跃期到来，包括三种情况：在当前活跃期起始时节点无待发数据帧，或在当前活跃期结束前节点成功地将待发数据帧传输至协调器；当退避尝试接入信道次数达到协议要求的上限，而该节点依然无法接入信道；节点估计出当前活跃期剩余时间不足以完成通过载波侦听多路接入/冲突避免算法进行数据帧传输所需的剩余步骤，包括空闲信道评估、数据帧传输、和等待确认帧。

3. 根据权利要求 1 所述的基于 IEEE 802.15.4 协议的传感器节点占空比独立自适应调节方法，其特征在于所述节点发送的数据帧在 IEEE 802.15.4 数据帧基础上，利用其 MAC 头部中的预留字段中的 1 比特作为队列信息字段。

4. 根据权利要求 1 所述的基于 IEEE 802.15.4 协议的传感器节点占空比独立自适应调节方法，其特征在于所述协调器广播的信标帧在 IEEE 802.15.4 信标帧基础上，在其 MAC 载荷部分中添加一个信标指数自适应控制域，包括信标指数自适应规则和地址列表两部分：占用 1 字节的信标指数自适应规则中包括的信标指数增加数量域和信标指数减少数量域两个同样占用 4 比特的域，分别表示信标指数自适应规则之后的地址列表中有信标指数增加变化和信标指数减少变化的节点地址数量；地址列表中只添加有信标指数更新变化的节点地址；如果某一种信标指数变化的节点数量大于信标指数自适应规则所限的 16 个，则多余节点的信标指数暂时保持不变。

基于 IEEE 802.15.4 协议的传感器节点占空比独立自适应调节方法

技术领域

本发明涉及一种广泛应用于无线传感器网络中的 IEEE 802.15.4 协议和在此基础上的节点占空比自适应调节方法及能量高效休眠机制，属无线网络通信技术领域。

背景技术

无线传感器网络（WSNs）是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点，通过无线自组织方式形成的一个多跳的网络系统，其目的是协作地感知、采集、处理网络覆盖区域中被感知对象的信息，并发送给观察者。

IEEE 802.15.4 是美国电气电子工程师学会最初为低速率无线个人域网络（LR-WPANs）制定的一套网络标准。而由于其物理层（PHY）的能量高效和鲁棒性，以及介质接入控制子层（MAC）的灵活性非常适合于低速率、低功耗、低成本、低复杂度的无线传感器网络应用，因此 IEEE 802.15.4 也成为了无线传感器网络的一套重要的通信协议。

IEEE 802.15.4 支持两种工作模式：(1)无信标使能模式(nonbeacon-enabled)：此时 MAC 通过非时隙载波侦听多路接入/冲突避免算法(CSMA/CA)进行控制；(2)信标使能模式(beacon-enabled)：此时各节点通过接收网络协调器周期性广播的信标帧(beacon)保持同步，MAC 通过时隙 CSMA/CA 算法进行控制。

在信标使能模式中，协议使用超帧(superframe)进行定时。超帧跟随在周期性的信标帧之后，并被分为活跃期(active portion)与可选的非活跃期(inactive portion)。对于活跃期，竞争接入周期(CAP)用于节点通过时隙 CSMA/CA 算法竞争信道资源；可选的无竞争接入周期(CFP)用于为特定应用分配特定的信道资源，主要是为了满足对端到端时延和带宽要求较高的应用。而在非活跃期，节点将进入低功耗的休眠模式。

在超帧结构中，信标间隔周期(beacon interval, BI) 定义为两个连续信标帧之间的时间间隔，由式(1)可知，其时间长度可以通过信标指数(beacon order, BO)

进行控制；活跃期长度定义为超帧持续时间（superframe duration, SD ），由式(2)可知，其时间长度可以通过超帧指数（superframe order, SO ）进行控制。其中 SD_0 为一个值为 960 symbols 的常量。

$$BI = SD_0 \times 2^{BO} \text{ symbols} \quad (1)$$

$$SD = SD_0 \times 2^{SO} \text{ symbols} \quad (2)$$

IEEE 802.15.4 节点占空比（duty cycle, DC ）定义为其信标间隔周期中活跃期长度 SD 与其当前整个信标间隔周期长度 BI 的比值。又结合式(1)和式(2)可知， DC 可以进一步由 BO 和 SO 的差值决定。

$$DC = \frac{SD}{BI} = 2^{SO-BO} \quad (3)$$

由于占空比可以决定节点休眠时间的长短，因此其对于节点的能量高效至关重要。此外，通过调整占空比还可以平衡节点的功率消耗和端到端时延性能。当占空比较低时，节点用于信道侦听、信道资源竞争、数据帧收发等操作的活跃期只占整个信标间隔周期的很小部分，而节点大部分时间休眠于低功耗的非活跃期。虽然节点的功率消耗和网络的生命周期是进行无线传感器网络协议设计时需要重点考虑的性能指标，但是如果占空比过低，会导致很大的网络端到端时延。因为节点在休眠之前未完成的操作及其在休眠过程中新加等待处理的操作，均要延迟到下一个信标间隔周期才能开始进行。因此如果周期内的非活跃期过长，那么这种延迟将会很大。相反，如果占空比较高时，网络的端到端时延性能将会改善，但是可能此时节点的大部分时间处在不必要的空闲侦听状态从而浪费大量宝贵的能量。

随着对 IEEE 802.15.4 协议研究的不断深入，目前已经提出了几种在其基础上的节点占空比自适应方法，但是又都各有不足。文献“DCA: 用于 IEEE 802.15.4 信标使能网络的占空比自适应算法”（“DCA: Duty-Cycle Adaptation Algorithm for IEEE 802.15.4 Beacon-Enabled Networks”，JEON J, LEE J W, HA J Y, et al. Proceedings of IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC). 2007. 110-113.）通过取定 BO 而调节 SO 来实现节点占空比的自适应调整。而 BO 取定就意味着

网内所有节点的信标间隔周期是一定的，即所有节点接收信标帧的频率是一定的，但是在节点数据流量较小时其信标帧接收频率是可以适当减小的。而根据对目前主流的低功耗 RF 芯片各工作状态功率消耗的测定结果来看，节点发送和接收状态的功率消耗是空闲状态的数十倍，因此减少节点对信标帧的接收频率比单纯减少节点空闲侦听更加有效。而文献“一种新型的用于 IEEE 802.15.4 网络的信标指数自适应算法”（“A New Beacon Order Adaptation Algorithm for IEEE 802.15.4 Networks”，NEUGEBAUER M, PLÖNNIGS J, KABITZSCH K. Proceedings of 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN). 2005. 302-311.）提出的方法与之前的方法正好相反，该方法是通过取定 SO 而调节 BO 来实现节点占空比的自适应调整的。但是该方法保留了 IEEE 802.15.4 的很多特性，依然是由网络协调器统一调节网内所有节点的同一个 BO （即同一个信标间隔周期），而协调器在每个周期之前只广播最小的一个 BO 可取值，这就意味着即使网内只有一个节点有数据流量，那么其它无流量节点的占空比也不能独自降低。

发明内容

本发明的目的在于针对现有技术的不足，提供一种基于 IEEE 802.15.4 协议的传感器节点占空比独立自适应调节方法，可以使作为网络中心控制节点的网络协调器独立地根据从各节点收到的数据帧发送队列信息对各节点占空比和信标间隔周期同时地进行自适应调节。节点在配合协调器工作的同时，根据能量高效休眠机制进一步保证功率消耗性能。

为实现上述目的，本发明考虑到网络的功率消耗和端到端时延两者之间的相互矛盾，在广泛应用于无线传感器网络的 IEEE 802.15.4 协议的基础上，提出一种有效的节点占空比独立自适应调节方法。在节点数据流量较小的情况下，通过延长该节点的信标间隔周期而延长节点休眠时间，进而减少节点功率消耗，同时降低节点的信标帧接收频率进而减少节点用于信标帧接收的功率消耗；在节点数据流量较大的情况下，通过缩短该节点的信标间隔周期而保证网络端到端时延性能，同时降低同一时间竞争信道资源的节点数量进而改善网络吞吐量

性能。节点同时采用能量高效休眠机制可使其于周期内活跃期提前进行休眠，从而进一步节省其功率消耗。本发明在保证节点能量高效的同时，使网络功率消耗和端到端时延在不同网络负载条件下取得良好的平衡。

本发明的基于 IEEE 802.15.4 协议的传感器节点占空比独立自适应调节方法，具体包括如下步骤：

1) 对于每个网内节点分别使网络协调器独立记录一个用于控制该节点信标间隔周期长度的信标指数，为每个节点的信标指数设置统一的调节范围，并取该调节范围中的最小值为初始广播的信标帧中各节点的信标指数初值；将用于控制各节点信标间隔周期中活跃期长度的超帧指数设定为不大于信标指数初值的常量；将由协调器控制的周期性信标帧的广播间隔设定为最小的信标间隔周期长度；由协调器广播初始信标帧，建立一个基于 IEEE 802.15.4 协议的无线传感器网络；

2) 协调器分别根据当前各信标指数计算相应的信标间隔周期长度，对相应的各节点进行独立定时计数，以掌握各节点的信标间隔周期的起始和结束时刻；同时，每个网内节点同样根据当前收到的信标指数计算其相应的信标间隔周期长度，以独立地进行定时，并与协调器对该节点信标间隔周期的控制保持同步；

3) 在各节点当前的信标间隔周期内，节点根据采用能量高效休眠机制的 IEEE 802.15.4 MAC 协议进行操作；在某一节点有数据帧发送的情况下，该节点需要为协调器提供自身的数据帧发送队列信息，即如果节点在发送数据帧的退避过程中检查到其缓冲区中还有其它待发数据帧或是又有新数据帧到达，那么此时该节点将其待发数据帧中的队列信息字段置位为 1，否则将其复位为 0；

4) 协调器根据对某一节点的定时计数信息，判断在该节点当前信标间隔周期内是否有收到其发送来的数据帧；如果收到该节点发送的数据帧，协调器进一步检查该数据帧中队列信息字段的值；如果队列信息字段值为 1，协调器在判断该节点的信标指数还未减少到最小值的情况下将该指数减 1 并将该节点的相关更新信息加入之后待广播的信标帧中，否则保持其最小值；如果队列信息字段值为 0，协调器保持该节点原有信标指数；如果在该节点的当前信标间隔周期

结束时协调器仍未收到其发送的数据帧，协调器在判断该节点的信标指数还未增加到最大值的情况下将该指数加 1 并将该节点的相关更新信息加入之后待广播的信标帧中，否则保持其最大值；

5) 各节点根据自身的定时信息在其当前信标间隔周期结束时，允许接收协调器新广播的信标帧并检查其中是否含有与其相关的信标指数更新信息；如果某一节点新接收的信标帧中含有与该节点相关的信标指数更新信息，则节点进行相应的信标指数更新操作，否则节点保持原有信标指数；在某一节点结束当前信标间隔周期并收到新的信标帧时，返回步骤 2 进入下一个信标间隔周期。

本发明中，节点采用一种能量高效休眠机制，即各节点在特定情况下于信标间隔周期内的活跃期即可提前进入休眠模式而不必等到非活跃期到来，包括三种情况：在当前活跃期起始时节点无待发数据帧，或在当前活跃期结束前节点成功地将待发数据帧传输至协调器；当退避尝试接入信道次数达到协议要求的上限，而该节点依然无法接入信道；节点估计出当前活跃期剩余时间不足以完成通过载波侦听多路接入/冲突避免算法进行数据帧传输所需的剩余步骤，包括空闲信道评估、数据帧传输、和等待确认帧。

所述节点发送的数据帧可在 IEEE 802.15.4 数据帧基础上，利用其 MAC 头部中的预留字段中的 1 比特作为队列信息字段。

所述协调器广播的信标帧可在 IEEE 802.15.4 信标帧基础上，在其 MAC 载荷部分中添加一个信标指数自适应控制域，包括信标指数自适应规则和地址列表两部分：占用 1 字节的信标指数自适应规则中包括的信标指数增加数量域和信标指数减少数量域两个同样占用 4 比特的域，分别表示信标指数自适应规则之后的地址列表中有信标指数增加变化和信标指数减少变化的节点地址数量；地址列表中只添加有信标指数更新变化的节点地址；如果某一种信标指数变化的节点数量大于信标指数自适应规则所限的 16 个，则多余节点的信标指数暂时保持不变。

本发明提出的传感器节点占空比独立自适应调节方法的优点如下：

1) 在节点长时间没有数据帧等待发送的情况下，协调器会通过该方法逐渐

将该节点相应的信标指数增大，即延长了相应的信标间隔周期，从而延长了节点休眠时间进而减少了节点功率消耗。信标间隔周期的延长同时降低了节点的信标帧接收频率，而根据对目前主流的低功耗 RF 芯片各工作状态功率消耗的测定结果来看，节点发送和接收状态的功率消耗是空闲状态的数十倍，因此为了进一步减少节点功率消耗，减少节点对信标帧的接收频率比单纯减少节点空闲侦听更加有效；

2) 在节点长时间没有数据帧等待发送之后产生突发数据流量的情况下，如果突发数据流量不大，则先竞争到信道资源成功发送数据帧的一方相应的信标指数会首先减小，从而在其它节点依然休眠时可以继续竞争信道资源，则继续成功发送数据帧的概率增大，这样可以使数据流量小的节点尽快退出信道资源竞争，缓解突发网络负载；

3) 在节点持续数据流量较大的情况下，协调器会通过该方法逐渐将该节点相应的信标指数减小，即缩短了相应的信标间隔周期，从而保证了网络端到端时延性能；

4) 由于各节点的定时周期是由网络协调器独立控制的，因此各节点信标间隔周期中用于竞争信道资源的活跃期并不是同时完全重叠在一起的，这样可以避免由网络协调器统一定时所造成的网内所有节点同时苏醒而在有限的活跃期内同时竞争信道资源。该方法可以使网内节点的活跃期和非活跃期更合理地分布，从而缓解了由重网络负载所导致的大量数据帧的碰撞和丢弃现象，进而改善了网络吞吐量性能。

5) 节点采用能量高效休眠机制，在不改变 IEEE 802.15.4 协议的情况下，进一步节省了节点的功率消耗。

综上所述，节点占空比独立自适应调节方法比较适用于数据流量较小且稳定的无线传感器网络应用，如医疗人体监控、生态环境监控、路况信息监控等。而该方法不太适用于对突发时延性能要求较高的应用，如突发告警，以及持续数据流量较大的应用，如多媒体通信。

附图说明

图 1 为典型的无线传感器网络应用。

图 2 为本发明实施例采用的仿真场景。

图 3 为本发明的网络协调器一般操作步骤。

图 4 为本发明的网络协调器操作示例。

图 5 为本发明实施例的网内节点功率消耗仿真曲线。

图 6 为本发明实施例的网络协调器功率消耗仿真曲线。

图 7 为本发明实施例的全网功率消耗仿真曲线。

图 8 为本发明实施例的端到端时延仿真曲线。

图 9 为本发明实施例的网络吞吐量仿真曲线。

具体实施方式

以下结合附图及具体的实施例对本发明的技术方案作进一步描述。

对于一个典型的无线传感器网络应用，由于整个网络覆盖区域内的节点众多且单个节点的通信范围有限，因此通过分簇算法将网络中各局部的节点分簇从而使整个网络形成分簇树形拓扑是一种比较有效的实现方式。如图 1 所示，每个 PAN 子网作为一个相对独立的节点簇由一个作为簇首的网络协调器负责管理，而各簇之间的数据流量由各簇簇首负责传递，并最终由一个第一网络协调器控制全网的运行。

为了关注于本发明方法性能的验证而不涉及其它具体技术，如节点分簇算法、路由选择算法等，对验证该方法的实验场景的设置主要考虑单个独立的节点簇，簇内由一个网络协调器作为簇首，而簇内其它节点与簇首形成一个星形拓扑结构。本实施例即选取图 1 中的一个节点簇如图 2 所示，节点 0 作为网络协调器负责对簇内节点 1-6 的控制管理。图 3 所示为采用本发明方法的网络协调器操作的一般步骤，而簇内节点主要为配合协调器进行相关操作。而图 4 所示为本实施例中协调器进行五个周期操作的示例。按本发明方法步骤，本实施例具体描述如下：

1) 在图 2 中的网络建立之初，需要设置系统参数。主要参数设置如表 1 所示，其余系统参数均采用 IEEE 802.15.4 协议中定义的缺省值。其中，四个节点

工作状态（包括空闲、休眠、发送、接收状态）的功率消耗根据低功耗 RF 芯片 TI/Chipcon CC2420 的测定结果而设置；对于每个网内节点分别使网络协调器独立记录一个用于控制该节点信标间隔周期长度的信标指数，为每个节点的信标指数设置统一的调节范围，本实例设置为[0, 6]，并取该调节范围中的最小值 0 为初始广播的信标帧中各节点的信标指数初值（需要指出的是，对于大部分低功耗传感器网络应用，信标指数最小值不必取很小值，而为了验证本发明方法的有效性，本实验场景中特别考虑最小值取 0 的最坏情况。）；将用于控制各节点信标间隔周期中活跃期长度的超帧指数设定为不大于信标指数初值的常量，本实例中设置为 0；将由协调器控制的周期性信标帧的广播间隔设定为最小的信标间隔周期长度；由协调器广播初始信标帧，建立一个基于 IEEE 802.15.4 协议的无线传感器网络；开始步骤 2 进入图 4 所示的第一个信标间隔周期。

表 1. 系统参数设置

PHY 头部	6 字节
MAC 头部	13 字节
数据帧载荷	100 字节
信道比特率	250 千比特/秒
空闲状态功耗	712 微瓦
休眠状态功耗	144 纳瓦
发送状态功耗	31.32 毫瓦
接收状态功耗	35.28 毫瓦
超帧指数 (SO)	0
信标指数最小值 (BO_{min})	0
信标指数最大值 (BO_{max})	6

2) (周期一) 协调器首先分别根据当前各信标指数计算相应的信标间隔周期长度，对相应的各节点进行独立定时计数，以掌握各节点的信标间隔周期的起

始和结束时刻；同时，每个网内节点同样根据当前收到的信标指数计算其相应的信标间隔周期长度，以独立地进行定时，并与协调器对该节点信标间隔周期的控制保持同步；

3) (周期一) 在各节点当前的信标间隔周期内，节点根据采用能量高效休眠机制的 IEEE 802.15.4 MAC 协议进行操作；对于节点 i 来说，本周期未向协调器发送数据帧，由于采用能量高效休眠机制，其可于信标间隔周期内的活跃期提前进入休眠模式而不必等到非活跃期到来，包括三种可能情况：在当前活跃期起始时节点无待发数据帧；当退避尝试接入信道次数达到协议要求的上限，而该节点依然无法接入信道；节点估计出当前活跃期剩余时间不足以完成通过载波侦听多路接入/冲突避免算法进行数据帧传输所需的剩余步骤，包括空闲信道评估、数据帧传输、和等待确认帧；

4) (周期一) 协调器根据对节点 i 的定时计数信息，判断在该节点当前信标间隔周期内是否有收到其发送来的数据帧；在 BO_i 和 SO 均为 0 的第一个信标间隔周期内，网络协调器没有收到节点 i 发送的数据帧，则网络协调器在此周期结束时将 BO_i 加 1，并将该节点的相关更新信息加入之后待广播的信标帧中；

5) (周期一) 各节点根据自身的定时信息在其当前信标间隔周期结束时，允许接收协调器新广播的信标帧并检查其中是否含有与其相关的信标指数更新信息；节点 i 进行相应的信标指数更新操作，在该节点结束当前信标间隔周期并收到新的信标帧时，返回步骤 2 进入图 4 所示的第二个信标间隔周期。

2)(周期二) 协调器分别根据当前各信标指数计算相应的信标间隔周期长度，对相应的各节点进行独立定时计数，以掌握各节点的信标间隔周期的起始和结束时刻；同时，每个网内节点同样根据当前收到的信标指数计算其相应的信标间隔周期长度，以独立地进行定时，并与协调器对该节点信标间隔周期的控制保持同步；

3) (周期二) 在各节点当前的信标间隔周期内，节点根据采用能量高效休眠机制的 IEEE 802.15.4 MAC 协议进行操作；对于节点 i 来说，本周期未向协调器发送数据帧，由于采用能量高效休眠机制，其可于信标间隔周期内的活跃期提

前进入休眠模式而不必等到非活跃期到来，包括三种可能情况：在当前活跃期起始时节点无待发数据帧；当退避尝试接入信道次数达到协议要求的上限，而该节点依然无法接入信道；节点估计出当前活跃期剩余时间不足以完成通过载波侦听多路接入/冲突避免算法进行数据帧传输所需的剩余步骤，包括空闲信道评估、数据帧传输、和等待确认帧；

4) (周期二) 协调器根据对节点 i 的定时计数信息，判断在该节点当前信标间隔周期内是否有收到其发送来的数据帧；由于 SO 不变，因此第二个周期的活跃期时间长度不变，而整个周期长度由于 BO_i 的增加而成为第一个周期的两倍，则占空比降为 50%；协调器在此周期内同样没有收到节点 i 发送的数据帧， BO_i 再增加 1，并将该节点的相关更新信息加入之后待广播的信标帧中；

5) (周期二) 各节点根据自身的定时信息在其当前信标间隔周期结束时，允许接收协调器新广播的信标帧并检查其中是否含有与其相关的信标指数更新信息；节点 i 进行相应的信标指数更新操作，在该节点结束当前信标间隔周期并收到新的信标帧时，返回步骤 2 进入图 4 所示的第三个信标间隔周期；

2) (周期三) 协调器分别根据当前各信标指数计算相应的信标间隔周期长度，对相应的各节点进行独立定时计数，以掌握各节点的信标间隔周期的起始和结束时刻；同时，每个网内节点同样根据当前收到的信标指数计算其相应的信标间隔周期长度，以独立地进行定时，并与协调器对该节点信标间隔周期的控制保持同步；

3) (周期三) 在各节点当前的信标间隔周期内，节点根据采用能量高效休眠机制的 IEEE 802.15.4 MAC 协议进行操作；在节点 i 有数据帧发送的情况下，该节点需要为协调器提供自身的数据帧发送队列信息，节点 i 在发送数据帧的退避过程中检查到其缓冲区中还有其它待发数据帧或是又有新数据帧到达，该节点将其待发数据帧中的队列信息字段置位为 1；对于节点 i 来说，本周期有向协调器发送数据帧，由于采用能量高效休眠机制，其可于信标间隔周期内的活跃期提前进入休眠模式而不必等到非活跃期到来，即情况：在当前活跃期结束前节点成功地将待发数据帧传输至协调器；

4) (周期三) 协调器根据对节点 i 的定时计数信息, 判断在该节点当前信标间隔周期内是否有收到其发送来的数据帧; 节点 i 的第三个周期的占空比降为 25%, 其休眠时间继续延长。而网络协调器在此周期收到了节点 i 发送的数据帧, 并且数据帧内的队列信息字段 F_q 显示节点 i 的缓冲区中还有待发数据帧, 则此时网络协调器将 BO_i 减 1, 并将该节点的相关更新信息加入之后待广播的信标帧中;

5) (周期三) 各节点根据自身的定时信息在其当前信标间隔周期结束时, 允许接收协调器新广播的信标帧并检查其中是否含有与其相关的信标指数更新信息; 节点 i 进行相应的信标指数更新操作, 在该节点结束当前信标间隔周期并收到新的信标帧时, 返回步骤 2 进入图 4 所示的第四个信标间隔周期;

2) (周期四) 协调器首先分别根据当前各信标指数计算相应的信标间隔周期长度, 对相应的各节点进行独立定时计数, 以掌握各节点的信标间隔周期的起始和结束时刻; 同时, 每个网内节点同样根据当前收到的信标指数计算其相应的信标间隔周期长度, 以独立地进行定时, 并与协调器对该节点信标间隔周期的控制保持同步;

3) (周期四) 在各节点当前的信标间隔周期内, 节点根据采用能量高效休眠机制的 IEEE 802.15.4 MAC 协议进行操作; 在节点 i 有数据帧发送的情况下, 该节点需要为协调器提供自身的数据帧发送队列信息, 节点 i 在发送数据帧的退避过程中检查到其缓冲区中没有其它待发数据帧或是新数据帧到达, 那么此时该节点将其待发数据帧中的队列信息字段复位为 0; 对于节点 i 来说, 本周期有向协调器发送数据帧, 由于采用能量高效休眠机制, 其可于信标间隔周期内的活跃期提前进入休眠模式而不必等到非活跃期到来, 即情况: 在当前活跃期结束前节点成功地将待发数据帧传输至协调器;

4) (周期四) 协调器根据对节点 i 的定时计数信息, 判断在该节点当前信标间隔周期内是否有收到其发送来的数据帧; 为了保证节点 i 缓冲区发送队列中数据帧的端到端时延性能, 第四个周期占空比又升为 50%。随后网络协调器收到了新的数据帧, 而其中 F_q 显示节点 i 的缓冲区中已没有待发数据帧, 那么此时

网络协调器无需再将 BO_i 减小，从而保证节点 i 获得更多的休眠时间；

5) (周期四) 各节点根据自身的定时信息在其当前信标间隔周期结束时，允许接收协调器新广播的信标帧并检查其中是否含有与其相关的信标指数更新信息；节点 i 保持原有信标指数；在某一节点结束当前信标间隔周期并收到新的信标帧时，返回步骤 2 进入图 4 所示的第五个信标间隔周期；

2) (周期五) 协调器分别根据当前各信标指数计算相应的信标间隔周期长度，对相应的各节点进行独立定时计数，以掌握各节点的信标间隔周期的起始和结束时刻；同时，每个网内节点同样根据当前收到的信标指数计算其相应的信标间隔周期长度，以独立地进行定时，并与协调器对该节点信标间隔周期的控制保持同步；

3) (周期五) 在各节点当前的信标间隔周期内，节点根据采用能量高效休眠机制的 IEEE 802.15.4 MAC 协议进行操作；对于节点 i 来说，本周期未向协调器发送数据帧，由于采用能量高效休眠机制，其可于信标间隔周期内的活跃期提前进入休眠模式而不必等到非活跃期到来，包括三种可能情况：在当前活跃期起始时节点无待发数据帧；当退避尝试接入信道次数达到协议要求的上限，而该节点依然无法接入信道；节点估计出当前活跃期剩余时间不足以完成通过载波侦听多路接入/冲突避免算法进行数据帧传输所需的剩余步骤，包括空闲信道评估、数据帧传输、和等待确认帧；

4) (周期五) 协调器根据对节点 i 的定时计数信息，判断在该节点当前信标间隔周期内是否有收到其发送来的数据帧；在第五个周期内，网络协调器未收到节点 i 发送的数据帧，重新将 BO_i 增加 1，并将该节点的相关更新信息加入之后待广播的信标帧中；

5) (周期五) 各节点根据自身的定时信息在其当前信标间隔周期结束时，允许接收协调器新广播的信标帧并检查其中是否含有与其相关的信标指数更新信息；节点 i 进行相应的信标指数更新操作，在该节点结束当前信标间隔周期并收到新的信标帧时，返回步骤 2 进入其下一个信标间隔周期。

以图 2 所示的星形网络作为实验场景，以所有网内节点 1-6 作为数据源，均

以一个固定的平均时间间隔向网络协调器发送泊松数据流量，而网络协调器负责向网内各节点广播信标帧。通过逐渐增加网内节点的数据帧发送频率，可以比较采用本发明方法的 IEEE 802.15.4 和传统 IEEE 802.15.4 在不同网络负载条件下的性能。

由于无线传感器网络中的节点通常采用电池供电，因此节点的功率消耗以及网络的生命周期是进行无线传感器网络协议设计时需要重点考虑的性能指标之一。而整个网络的功率消耗分为两个部分：网内节点和网络协调器的功率消耗。图 5 所示为采用本发明方法的 IEEE 802.15.4 和传统 IEEE 802.15.4 关于网内节点功率消耗的仿真比较曲线，其中红色曲线对应采用本发明方法的 IEEE 802.15.4，黑色曲线对应传统 IEEE 802.15.4 取定不同 BO 时的仿真结果。从图 5 可以看出，当节点数据流量较小时，以每节点平均 1 数据包/秒为例，此时采用本发明方法的 IEEE 802.15.4 的性能接近于传统 IEEE 802.15.4 在 BO 取 5、6 时的性能，即协议优先保证节点的功率消耗性能。这是因为当传统协议 BO 取定为 6 时，节点信标间隔周期正好接近 1 秒，对于平均 1 数据包/秒的数据流量来说节点在大部分情况下可以保证一个周期发送一个数据帧而缓冲区发送队列不会过多滞留待发数据帧，即采用本发明方法的 IEEE 802.15.4 可以使节点大部分时间使 BO 保持在 5、6 左右。而当节点数据流量较大时，以每节点平均 32 数据包/秒为例，此时采用本发明方法的 IEEE 802.15.4 的性能接近于传统 IEEE 802.15.4 在 BO 取 0、1 时的性能，即协议优先保证网络的端到端时延性能而非节点的功率消耗。

为了研究方便，很多现有的研究成果通常假设网络协调器是有交流供电的，因此在考虑功率消耗时只考虑网内节点的功率消耗。但是为了使设计的协议具有更广泛的适用性，网络协调器的功率消耗性能也是需要考虑的。由于本发明方法是以牺牲部分网络协调器的能量而换取网内其它节点的能量节省的，因此需要验证这种牺牲是否可以换取整个网络功率消耗的节省，这样就可以通过节点分簇算法的网络协调器轮换以保证全网节点能量的均衡消耗。图 6 所示为采用本发明方法的 IEEE 802.15.4 和传统 IEEE 802.15.4 关于网络协调器功率消耗的仿真比较曲线。从图 6 可以看出，当节点数据流量较小时，采用本发明方法的

网络协调器功率消耗相对较高。这是因为网络协调器始终需要以 BO 取 0 时的最小信标间隔周期广播信标帧，而对于传统 IEEE 802.15.4 来说在 BO 取较大值时，网络协调器用于信标帧广播的功率消耗会明显减少。而当节点数据流量较大时，采用本发明方法的网络协调器功率消耗依然相对较高，但是此时网络协调器的大部分功率消耗是用于数据帧的接收而不是信标帧的广播，因此高频率的信标帧广播所带来的影响在节点数据流量较大时被弱化了。

图 7 所示为采用本发明方法的 IEEE 802.15.4 和传统 IEEE 802.15.4 关于全网功率消耗的仿真比较曲线，即由图 5 和图 6 所示曲线相加得到。从图 7 可以看出，在需要保证功率消耗性能的低数据流量情况下，全网的功率消耗还是相对较低的。而且随着节点数的增加，网络协调器用于高频率信标帧广播的额外功率消耗对于全网功率消耗来说会更加的不明显。

提出占空比自适应调节方法的目的就是能够使网络的功率消耗和端到端时延这对相互矛盾的性能指标能够在不同的网络负载条件下取得良好的平衡，因此采用本发明方法的 IEEE 802.15.4 和传统 IEEE 802.15.4 关于端到端时延性能的比较也是需要考虑的，如图 8 所示。从图 8 可以看出，随着节点数据流量的增大，采用本发明方法的 IEEE 802.15.4 的端到端时延性能有明显的改善，且大大优于传统 IEEE 802.15.4 在 BO 取较大值时的性能。

对于网络吞吐量来说，由于本发明方法可以避免由网络协调器统一定时所造成的网内所有节点同时苏醒而在有限的活跃期内同时竞争信道资源，因此本发明方法同样也可以在一定程度上保证网络吞吐量性能。如图 9 所示，采用本发明方法的网络吞吐量随网络负载的增加而平稳上升，而相比之下传统 IEEE 802.15.4 的吞吐量性能则受到较重网络负载的明显影响而上升缓慢甚至下降。

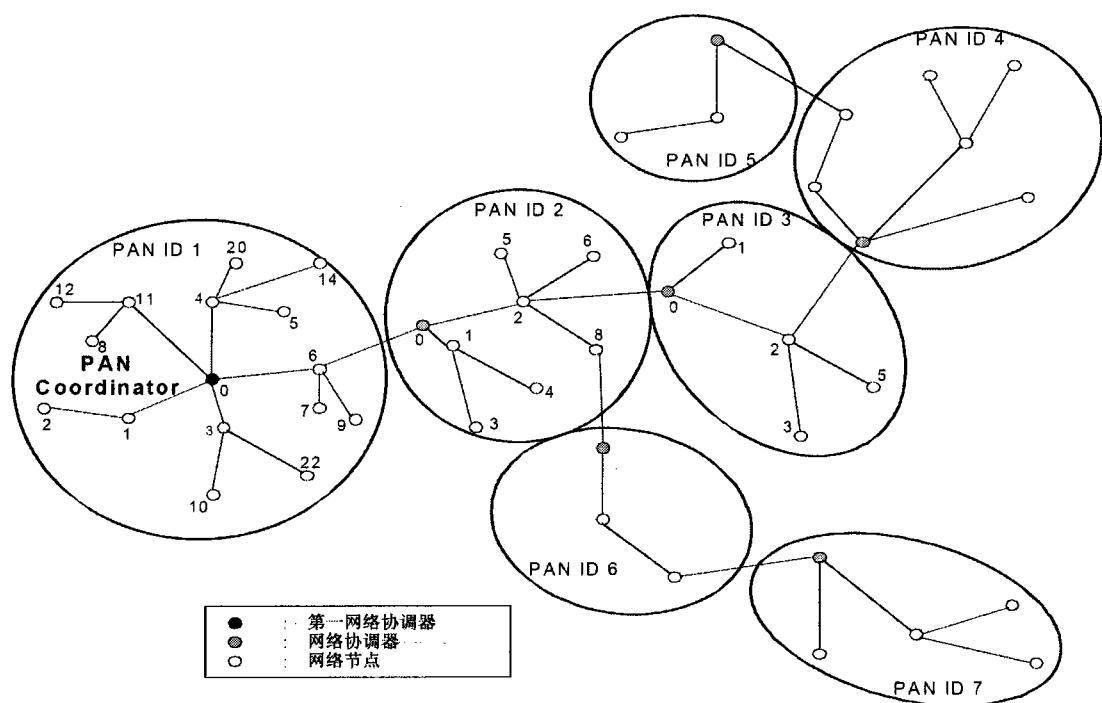


图 1

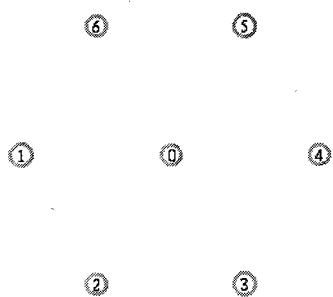


图 2

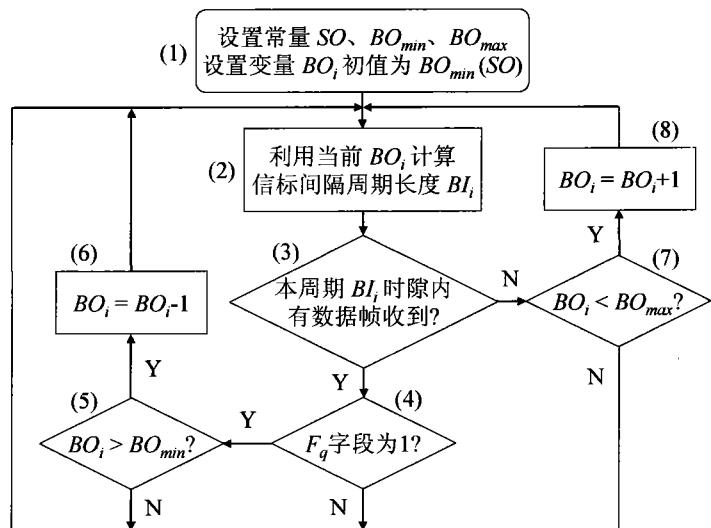


图 3

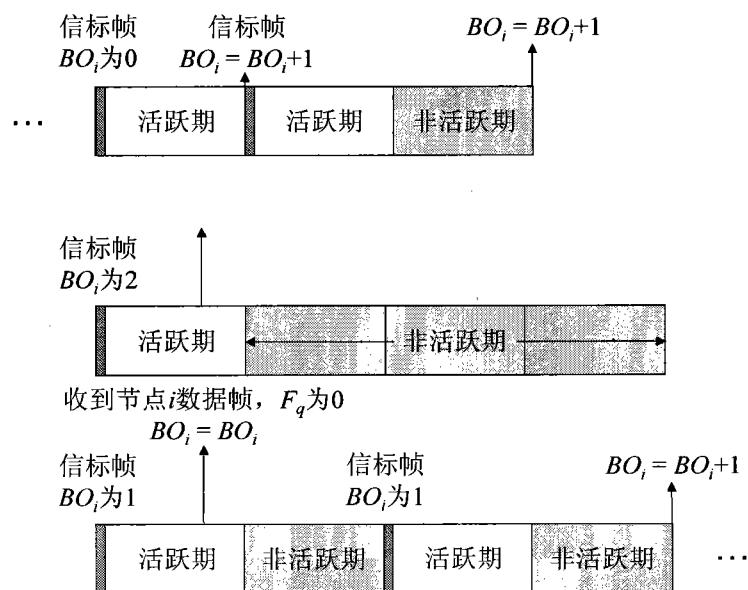


图 4

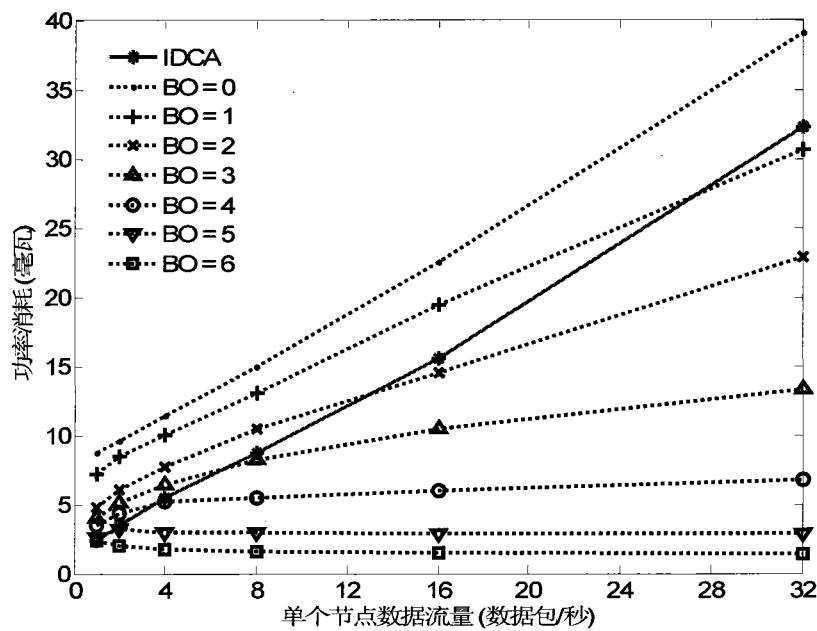


图 5

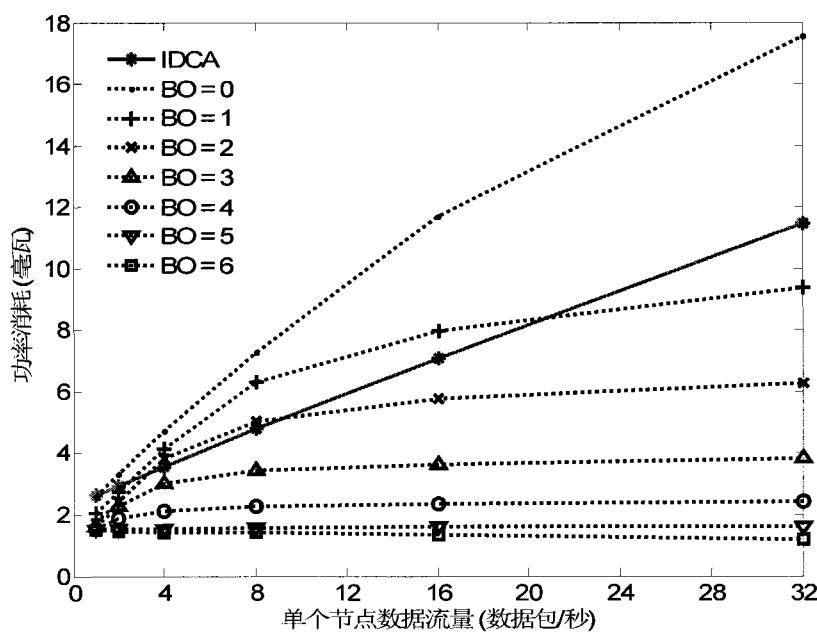


图 6

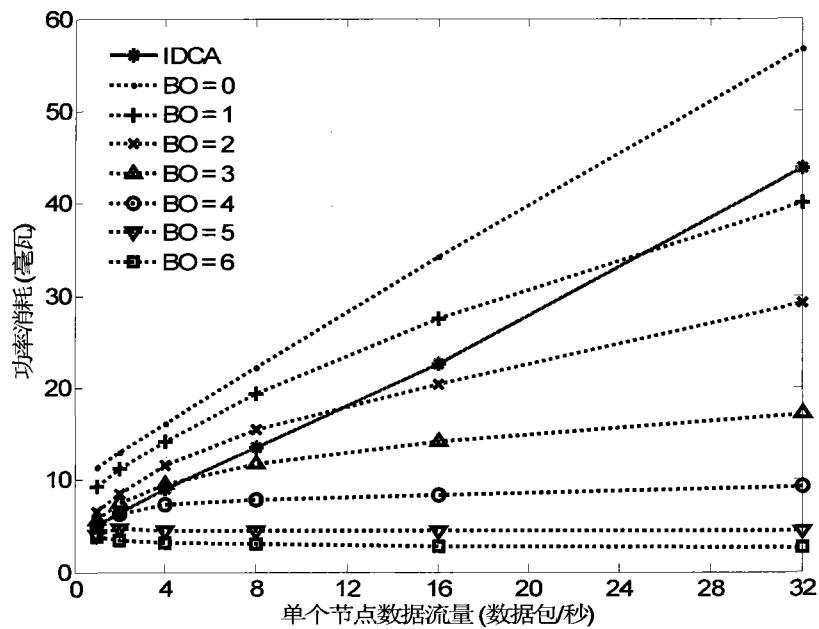


图 7

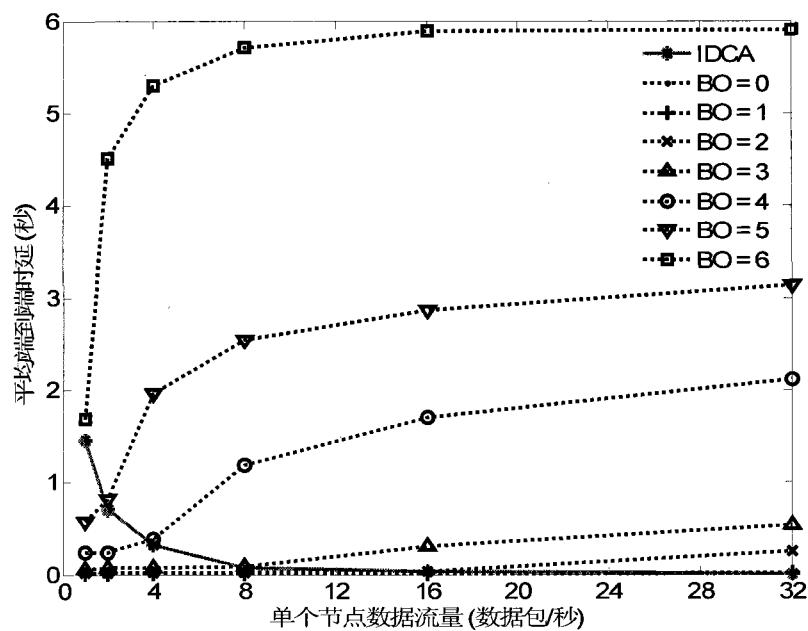


图 8

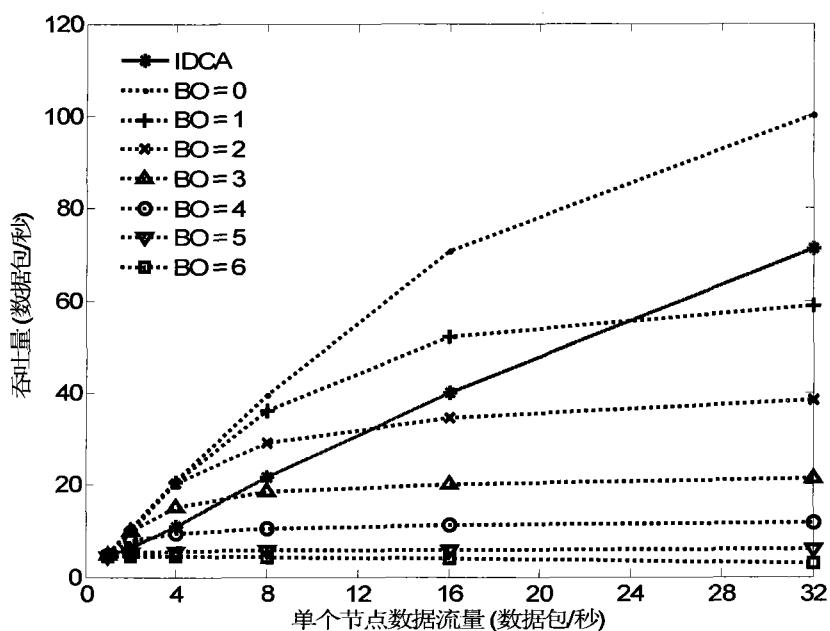


图 9